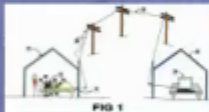


### ¿Qué es una línea de transmisión?

Es un sistema de conductores capaces de transmitir potencia eléctrica desde una fuente a una carga.

Algunos ejemplos de líneas de transmisión



### ¿¿¿Una instalación eléctrica???

#### ¿¿¿En que caso se le debe aplicar la teoría de líneas???

Primero es indispensable conocer los fundamentos de la teoría de líneas y en base a ellos determinar su rango de aplicación.

Para contestarlo cambiemos la pregunta

#### ¿Para que se utiliza un Instrumento electrónico?

Los instrumentos electrónicos se utilizan básicamente para realizar mediciones sobre un circuito **sin afectar el funcionamiento del mismo.**

### ¿De que depende que al medir sobre un circuito se pueda afectar su funcionamiento?

Un circuito cambia su funcionamiento cuando se modifica dicho circuito o cuando se inyecta o se extrae energía del mismo. Esto dependerá de:

- Las características del instrumental utilizado
- Los conductores (líneas de transmisión) utilizados para interconectar el circuito bajo prueba (DUT por sus siglas en inglés) con dicho instrumental

### Clasificación de las líneas de transmisión

#### • Según su equilibrio eléctrico

- Balanceadas: son aquellas donde entre cada conductor y tierra aparece la misma diferencia de potencial (en módulo)
- Desbalanceadas: no se cumple lo mencionado en el párrafo anterior ya que generalmente uno de los conductores está vinculado a tierra.

#### • Según su geometría

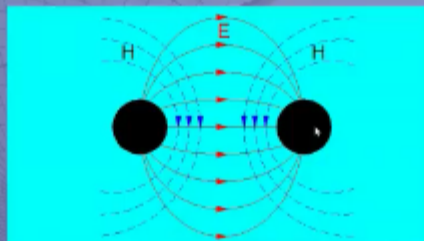
Unifilares, bifilares, par trenzado, coaxiales, cables radiantes, etc.

El análisis teórico que se desarrollará a continuación es válido para cualquiera de los tipos de líneas mencionados

### Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

#### Mediante la teoría electromagnética

En una línea bifilar se pueden plantear las ecuaciones que describan la distribución del campo electromagnético en la misma



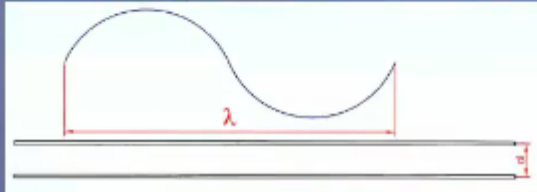
De la figura se puede deducir la existencia de un vector de Poynting que va a lo largo de la línea dado por la ecuación

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$$

## Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

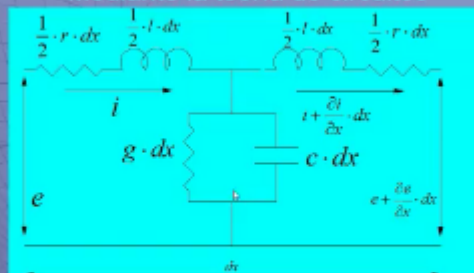
## Mediante la teoría de circuitos

Esta visión más simplificada de las líneas de transmisión sólo es válida mientras que la distancia que separa los distintos conductores (d) que conforman la misma sea mucho menor que la longitud de onda ( $\lambda$ ) de las señales que viajan por la misma. De esta forma la onda se propaga a lo largo de la línea en lo que se denomina Modo Transversal Electromagnético (TEM por sus siglas en inglés)



## Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

## Mediante la teoría de circuitos



donde

- >  $l$  es la inductancia serie por metro
- >  $r$  es la resistencia serie por metro
- >  $c$  es la capacidad paralelo por metro
- >  $g$  es la conductancia paralelo por metro

## Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

## Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5

Definiendo ,

$$\sqrt{z \cdot y} = \alpha + j \cdot \beta = \gamma \quad \sqrt{\frac{z}{y}} = Z_0$$

Donde

- $\gamma$ : constante de propagación de la línea .....
- $\alpha$ : atenuación de la línea .....
- $\beta$ : constante de fase de la línea .....
- $Z_0$ : impedancia característica .....

Las ecuaciones E4 y E5 quedan

$$E_{(x)} = V_1 \cdot e^{-\gamma \cdot x} + V_2 \cdot e^{\gamma \cdot x}$$

$$I_{(x)} = \frac{V_1}{Z_0} \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{V_2}{Z_0} \cdot e^{\gamma \cdot x}$$



66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9

**CONCLUSIONES**

1. En una línea viajan dos señales: una incidente (desde generador hacia la carga) y una reflejada (desde la carga hacia el generador)
2. Si la línea termina en una impedancia igual a su impedancia característica la señal reflejada es nula

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9

Si en la ecuación E8 consideramos que la línea termina adaptada (no existe señal reflejada) y que la atenuación de la línea es nula ( $\alpha = 0$ )

$$E_{(d)} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot z} = \frac{E_i + I_i \cdot Z_0}{2} \cdot e^{j(\omega \cdot t + \beta \cdot d)}$$

Y ahora buscamos las dos coordenadas ( $d_1$  y  $d_2$ ) más próximas tales que en un mismo momento ( $t$ ) la fase sea la misma

$$e^{j \cdot \beta \cdot d_1} = e^{j \cdot \beta \cdot d_2}$$

Denominando longitud de onda ( $\lambda$ ) a la distancia que separa estos dos puntos queda

$$\beta \cdot \lambda = 2 \cdot \pi$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10

$$\frac{(d_1 - d_2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{\omega}{\beta}$$

El primer miembro representa la velocidad de propagación ( $v_p$ ) desde el generador hacia la carga (recordemos que nuestro origen de coordenadas se encuentra sobre esta última)

$$v_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}} = \lambda \cdot f$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10 E11

**CONCLUSIÓN**

1. La longitud de onda de una señal que viaja por una línea de transmisión depende de: la frecuencia de la señal y de un parámetro de la línea, su velocidad de propagación (que está determinado por el dieléctrico con el que está construido la línea)
2. Por lo tanto una misma señal aplicada sobre dos líneas distintas de igual longitud, pero con distinto dieléctrico llegará al final de las mismas en instantes distintos

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10 E11

$$Z_L = \frac{e_L}{i_L} = \frac{e_{iL} + e_{rL}}{\frac{e_{iL}}{Z_0} - \frac{e_{rL}}{Z_0}} = Z_0 \cdot \frac{1 + \frac{e_{rL}}{e_{iL}}}{1 - \frac{e_{rL}}{e_{iL}}}$$

Definiendo a la relación entre la tensión reflejada y la tensión incidente como el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ) queda

$$\Gamma = \frac{e_{rL}}{e_{iL}} \quad Z_L = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión  
Mediante la teoría de circuitos

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10 E11 E12 E13

E14

Donde se puede apreciar que a lo largo de la línea se verá una señal periódica con sus correspondientes mínimos y máximos. A la relación entre el valor máximo y mínimo se la denomina relación de onda estacionaria ROE (o VSWR en inglés).

$$ROE = \frac{|V_1| + |V_2|}{|V_1| - |V_2|} = \frac{1 + \frac{|V_2|}{|V_1|}}{1 - \frac{|V_2|}{|V_1|}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

Implicancias de tener una línea de transmisión en un circuito

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10 E11 E12 E13

E14

$$Z_{(d)} = \frac{Z_L + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}{\frac{1}{Z_0} \cdot Z_L \cdot \tanh(\gamma \cdot d) + 1}$$

Multiplicando numerador y denominador por  $Z_0$ ...

$$Z_{(d)} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}{Z_0 + Z_L \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

Implicancias de tener una línea de transmisión en un circuito

T1 T2 E3 E4 E5 L6 L7 E8 E9 E10 E11 E12 E13

E14 E15

$$Z_{(d)} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d\right)}{Z_0 + j \cdot Z_L \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d\right)}$$

1. Si  $d = \lambda / 2$  o múltiplo entero de  $\lambda / 2$

$$Z_e = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2}\right)}{Z_0 + j \cdot Z_L \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2}\right)} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + j \cdot 0}{Z_0 + j \cdot 0} = Z_L$$

66.44 Instrumentos Electrónicos Introducción a Líneas de Transmisión

Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

### CONCLUSIONES

Una línea ....

1. Introduce un retardo mensurable en la señal que viaja por ella.
2. Debido a la atenuación que posee se comporta como un filtro pasabajos
3. Por la misma pueden viajar dos señales: una incidente (desde el generador hacia la carga) y una reflejada (desde la carga hacia el generador). Si la línea finaliza en una impedancia igual a la impedancia característica (línea adaptada) la señal reflejada se anula.



## Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

**CONCLUSIONES**

4. La relación entre señal reflejada e incidente se denomina coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ), cumpliéndose las siguientes relaciones:

$$\Gamma = \frac{e_r}{e_i} \quad \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad Z_L = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

5. La longitud de onda de una señal que viaja por una línea está determinada por la velocidad de propagación de la línea y por la frecuencia de la señal según la siguiente expresión:

$$v_p = \lambda \cdot f$$

## Análisis del funcionamiento de una línea de transmisión

**CONCLUSIONES**

6. La impedancia que presenta una línea de impedancia característica  $Z_0$  finalizada en una impedancia  $Z_L$  depende de la longitud de la línea ( $d$ ), de su atenuación ( $\alpha$ ), de la longitud de onda de la señal en la línea ( $\lambda$ ) y está dada por la siguiente expresión:

$$Z_e = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \cdot \tanh(\alpha \cdot d + j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d)}{Z_0 + Z_L \cdot \tanh(\alpha \cdot d + j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d)}$$

**Características técnicas de cables coaxiales comerciales**

A medida que sube la frecuencia de la señal en el cable aparecen otros modos de propagación no deseados por lo tanto es importante conocer la máxima frecuencia de trabajo la cual se puede calcular como:

$$f_c = \frac{2 \cdot c}{\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot (d + D)}$$

Donde:

$c$  = velocidad de la luz en el vacío  
 $\epsilon_r$  = permitividad relativa del dieléctrico  
 $d$  = diámetro del conductor interior  
 $D$  = diámetro del conductor exterior

La impedancia característica de la línea se obtiene como (aproximación válida para frecuencias superiores a 5 Mhz)

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

**Características técnicas de cables coaxiales comerciales**

Y la atenuación (dB/100m) para frecuencias superiores a 10 Mhz se puede aproximar a

$$\alpha = \frac{4,58 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot f}{\ln \frac{D}{d}} \cdot \left( \frac{1}{d \cdot \sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{D \cdot \sqrt{\sigma_2}} \right) + 9,1 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot f \cdot \tan \delta$$

Donde los diámetros se expresan en mm, la frecuencia en Mhz y:

$\sigma_1$  = conductividad del conductor interior (MS/m)

$\sigma_2$  = conductividad del conductor exterior (MS/m)

$\tan \delta$  = Factor de disipación del dieléctrico

La atenuación además varía con la temperatura siguiendo aproximadamente la siguiente fórmula

$$\alpha_T = \alpha_{(20^\circ C)} \cdot \sqrt{1 + 0,004 \cdot (T - 20^\circ C)}$$

Si bien al analizar la teoría de líneas de transmisión se mencionó que no se utilizaría la teoría electromagnética debido a su complejidad matemática, es muy útil caracterizar una línea de transmisión en función del tiempo (teoría electromagnética) ya que revela fácilmente la impedancia característica de la línea y la naturaleza, en caso de existir, de las discontinuidades a lo largo de la misma. Estas discontinuidades pueden ser resistivas, inductivas o capacitivas y ser del tipo serie o paralelo. Toda esta información puede obtenerse simplemente mirando la pantalla de un osciloscopio.

**¿Para que caracterizar discontinuidades en una línea de transmisión?**

- Determinar punto de falla en líneas de gran longitud
- Caracterizar el funcionamiento de microstrips y buses de alta velocidad (USB 2.0, Rambus, etc)
- Otras

**¿Cómo se pueden medir las características de una línea de transmisión partiendo de un análisis temporal?**

En principio simplemente inyectando un pulso por uno de los extremos de la línea (señal incidente) y midiendo en el MISMO EXTREMO la forma del pulso reflejado y comparándola con la del pulso incidente.

Por lo tanto solo necesitaríamos tener un generador de pulsos y un osciloscopio (a medida que profundicemos el tema veremos que características necesitan tener) y conectarlos de la siguiente forma.

